

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по научной и инновационной
деятельности Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор

Ворожцов Александр Борисович

«13» сентября 2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Шереметьева Вадима Алексеевича

«Научно-технологические основы получения и обработки сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb методами комбинированной термомеханической обработки и селективного лазерного плавления для изготовления ортопедических имплантатов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа посвящена разработке основ получения и обработки сверхэластичных сплавов на основе Ti-Zr-Nb медицинского назначения с применением методов комбинированной термомеханической обработки (ТМО) и селективного лазерного плавления. Исследования сплавов Ti-Zr-Nb с памятью формы как перспективных материалов для изготовления имплантатов, благодаря сочетанию биомеханической и биохимической совместимости, приобрели широкое распространение в последние десятилетия. Большинство этих исследований носят фундаментальный характер или выполнены в лабораторных условиях. Актуальность этого прикладного исследования обусловлена необходимостью в разработке технологий получения и обработки новых сплавов Ti-Zr-Nb для изготовления ортопедических имплантатов, в том числе персонализируемых. В основе решения этой научной проблемы в диссертации лежит установление взаимосвязи между технологическими, термомеханическими условиями получения и обработки, структурно-фазовым состоянием, кристаллографической текстурой, комплексом механических и функциональных свойств сверхэластичных сплавов Ti-Zr-Nb.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 304 страницах машинописного текста, состоит из введения, списка используемых сокращений, 9 глав и заключения из 15 пунктов. Включает 164 рисунка, 29 таблиц, список использованных источников из 239 наименований, четыре приложения.

Во введении обоснована актуальность исследования, выбора материала и подходов к его обработке, сформулированы цель и задачи диссертации. Приведены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, подтверждение достоверности и апробации результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор источников литературы в указанной области исследований. Рассмотрены требования к материалам для ортопедических имплантатов, преимущества и недостатки современных сплавов для их изготовления. Подробно рассмотрены перспективные сплавы с памятью формы на основе Ti-Zr-Nb и обоснован выбор химического состава объекта исследования. Особое внимание уделено промышленным методам получения и обработки металлических биоматериалов, включающих методы термомеханической обработки и аддитивных технологий.

Во второй главе описан подход к получению объектов исследования (слитки сплава Ti-Zr-Nb) их обработке, изучению и испытаниям, обеспечивающим выполнение поставленных задач и достижение цели работы. Приведено описание методов выплавки слитков большого развеса, оценки их химического состава и методов первичной термомеханической обработки, направленной на получения заготовок для последующих обработок. Представлена общая схема технологических маршрутов реализации операций обработки слитков. В заключительной части главы описан общий подход к исследованию структуры и свойств сплава Ti-Zr-Nb после различных обработок, позволяющий установить взаимосвязь фазо- и структурообразования с комплексом механических и функциональных свойств.

В третьей главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований низкотемпературного и высокотемпературного термомеханического поведения сплава с памятью формы Ti-Zr-Nb в различных температурно-скоростных условиях деформации сжатием. По результатам исследования термомеханического поведения в условиях осадки в широком интервале температур и скоростей деформаций установлены закономерности изменения параметров диаграмм деформации, твердости, формирования структуры и фазового состояния сплава Ti-Zr-Nb. На основании установленных закономерностей разработаны рекомендации по выбору методов и режимов термомеханической обработки сплавов Ti-Zr-Nb для разработки сквозной технологии от слитка до готового полуфабриката.

В четвертой главе описаны результаты исследования влияния условий радиально-сдвиговой прокатки (РСП) и ее сочетания с ротационной ковкой (РК) на напряженно-деформированное состояние и особенности развития пластической деформации при обработке прутковых полуфабрикатов из сплава Ti-Zr-Nb в сравнении с серийным сплавом ВТ6 с применением конечно-элементного моделирования и использованием реологических моделей. По результатам исследования сделано несколько ключевых выводов, которые имеют практическую значимость поскольку позволяют прогнозировать качество получаемых прутковых полуфабрикатов и определять рациональные технологические параметры для их обработки. В частности, показано, что сплав Ti-Zr-Nb проявляет более высокую склонность к развитию неравномерности деформации по сечению заготовки по сравнению с ВТ6, что связано с особенностями реологического поведения и обуславливает необходимость сочетания РСП и РК при термомеханической обработке.

В пятой главе исследованы возможности управления структурой и свойствами исследуемого сплава Ti-Zr-Nb методами низкотемпературной и высокотемпературной термомеханической обработки (НТМО и ВТМО), включающей РСП, РК, холодную прокатку (ХП) и последеформационный отжиг (ПДО) в различных сочетаниях, реализованных в лабораторных и полупромышленных условиях. По результатам работ установлены закономерности структурообразования и связанного с ним изменения механических и функциональных свойств сплава Ti-Zr-Nb в результате НТМО,

включающей холодную прокатку со степенями деформации от умеренной ($\epsilon=0,3$) до интенсивной ($\epsilon=3$) и ПДО при температурах 450–600 °С. Показано, что формирование в сплаве полигонизованной субмикросубзеренной структуры β -фазы в результате умеренной холодной прокатки и ПДО при 550 °С обеспечивает наилучший комплекс механических и функциональных свойств среди других вариантов ТМО по схеме НТМО. Кроме того, показано, что сплавы Ti-Zr-Nb со смешанной динамически полигонизованной и динамически рекристаллизованной структурой β -фазы, сформированной в результате горячей деформации в цикле ВТМО, демонстрируют повышение функциональной усталостной долговечности по сравнению со структурой, сформированной в результате развития статических процессов при ПДО в цикле НТМО.

В шестой главе представлены результаты исследования структуры и свойств длинномерных прутковых полуфабрикатов из сплава Ti-Zr-Nb, полученных в промышленных условиях путем применения схем НТМО и ВТМО, включающих РСП, РК, продольной прокатки (ПП) и ПДО. В результате проведенных исследований установлена взаимосвязь между механическим/функциональным поведением, структурно-фазовым состоянием, и кристаллографической текстурой сплава после НТМО и ВТМО, включающих РК и ПДО. Показано, что в результате НТМО с ПДО при 550 °С формируется статически рекристаллизованная мелкозернистая (<5 мкм) структура в периферийных зонах и смешанная статически рекристаллизованная структура и полигонизованная субструктура в центральной части прутка. Такое структурное состояние обеспечивает высокий комплекс статических механических и функциональных свойств: относительно высокую прочность при испытаниях на растяжение ($\sigma_s \approx 680$ МПа) и трехточечный изгиб (1550 МПа), низкий инженерный модуль Юнга ($E < 40$ ГПа) и высокую максимальную обратимую сверхупругую деформацию ($\epsilon_r^{se}{}_{max} = 3,4$ %). Установлено, что ВТМО прутковых полуфабрикатов приводит к формированию более однородной по сравнению с НТМО (ПДО при 550 °С) динамически полигонизованной субструктуры внутри зерен среднего размера 5–10 мкм после ГРК при 600 °С (РК600) и 15–20 мкм после ГРК при 700 °С (РК700). После РК700 в прутке формируется наиболее однородная кристаллографическая текстура по поперечному сечению с максимальной интенсивностью, близкой к направлению $[011]_\beta$, наиболее благоприятному для реализации обратимой деформации, вдоль направления вытяжки. Прочность сплава после ВТМО сильно зависит от температуры РК ($\sigma_s \approx 670$ МПа для РК600 и ≈ 590 МПа для РК700), что связано с уменьшением концентрации дефектов решетки при повышении температуры РК. Снижение прочности после РК700 компенсируется более высокой обратимой сверхупругой деформацией ($\epsilon_r^{se}{}_{max} = 3,1$ %) и более низким модулем Юнга ($E < 40$ ГПа) по сравнению с $\epsilon_r^{se}{}_{max} = 2,7$ % и $E \approx 45$ ГПа после РК600.

Экспериментально показано, что длинномерные прутковые полуфабрикаты, подвергнутые ВТМО, демонстрируют стабильное поведение при циклических испытаниях: более медленное накопление остаточных деформаций в течение первых 10 циклов по сравнению с НТМО и наилучшую функциональную усталостную долговечность при изгибе. Эти преимущества ВТМО связаны с образованием динамически полигонизованной субструктуры, субзерна которой разделены малоугловыми границами, проницаемыми для растущих кристаллов мартенсита и тем самым способствующими релаксации пиковых напряжений. В случае РК700 усталостная долговечность выше, а характеристики сверхупругости лучше, чем после РК600, из-за формирования благоприятной кристаллографической текстуры.

По результатам исследований разработан маршрут технологических операций ТМО, позволяющий реализовать обработку слитка из сплава Ti-Zr-Nb путем преобразования его в длинномерный прутковый полуфабрикат. Заключительная часть разработанного маршрута технологических операций ТМО, включающей только РК, была скорректирована следующим образом: РК при температуре 700 °С для получения заготовки Ø9,5 мм, ГПП в трехвалковом калибре (4 клетки: треугольник-круг-треугольник-круг) при температуре 700 °С для получения пруткового полуфабриката диаметром 6,1 мм, горячая правка растяжением с нагревом до 700 °С в течение 10–15 с, механическая обработка прутка на бесцентровом шлифовальном станке для получения конечного диаметра 5,5 мм. В результате реализации указанной технологии в условиях ООО «Мегаметалл» получена опытная партия длинномерных прутковых полуфабрикатов, удовлетворяющая требованиям к их геометрии. Из опытной партии прутковых полуфабрикатов в ООО «КОНМЕТ» изготовлены балки для систем транспедикулярной фиксации позвоночника и проведены их стандартизированные испытания.

Восьмая глава посвящена исследованию возможностей управления структурой и свойствами сплава Ti-Zr-Nb с применением интенсивной пластической деформации методом РКУП с целью формирования ультрамелкозернистой (субмикро- и нанокристаллической) структуры в объемной заготовке, повышения прочностных характеристик и сохранения высокого комплекса функциональных свойств. Выявлены закономерности формирования структуры, фазового состояния и кристаллографической текстуры сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb в результате низкотемпературной и высокотемпературной РКУП и ПДО и установлена их взаимосвязь с механическими и функциональными свойствами. Установлено, что РКУП при 500 °С, обеспечивающее технологичность при получении качественных заготовок из сплава Ti-Zr-Nb, способствует формированию в сплаве динамически полигонизованной субструктуры β -фазы и реализации наилучшего сочетания механических и функциональных свойств с высокой функциональной долговечностью.

В восьмой главе исследованы возможности управления структурой и свойствами исследуемого сплава Ti-Zr-Nb сочетанием методов селективного лазерного плавления (СЛП) и термической обработки (ТО). Первый раздел главы посвящен разработке режимов СЛП для изготовления сплава Ti-Zr-Nb с низким уровнем дефектов. Описаны исследования изменения химического состава, геометрии, относительной плотности, фазо- и структурообразования в зависимости от режимов СЛП, установленных в рамках реализации подхода, включающего численное моделирование и экспериментальную верификацию. С применением экспериментальных данных и алгоритма численного моделирования разработаны карты режимов СЛП сплава Ti-Zr-Nb, позволяющие прогнозировать относительную плотность получаемого материала и морфологию зеренной структуры. Расхождения между экспериментально измеренными и численно рассчитанными значениями не превышают 2 % для плотности материала и 16 % для среднего размера зерна.

Установлено, что термическая обработка сплава Ti-Zr-Nb после СЛП при температуре 550 °С (15–30 мин) приводит к повышению пластичности, небольшому снижению (на 10–25 МПа) предела прочности и более существенному уменьшению (на 75–135 МПа) предела текучести. После такой термической обработки существенно повысилась величина максимальной сверхупругой обратимой деформации при комнатной температуре (с 0,2 % после СЛП до 0,8 % после отжига). Функциональные испытания при отрицательных температурах выявили влияние термической обработки и температуры механических

испытаний на особенности сверхупругого поведения сплава Ti-Zr-Nb после СЛП, показывающее значительное совершенствование сверхупругого поведения сплава и увеличение обратимой сверхупругой деформации ($\epsilon_r^{SE} = 2,7\%$).

Показано, что существенное изменение сверхупругого поведения связано со значительным понижением температуры M_s , вызванным изменением химического состава сплава в процессе распыления и СЛП – увеличением содержания циркония и ниобия. В этой связи для реализации сверхупругого состояния при комнатной температуре в СПФ Ti-Zr-Nb, полученных методом СЛП, рекомендуется учитывать выгорание Ti. Отжиг при 550 °С, показавший наилучший комплекс механических и функциональных свойств в различных испытаниях, следует рассматривать, как наиболее перспективный режим термической обработки

Результатами исследований, изложенных в заключительной части главы, обоснована корректировка состава исходного слитка, заключающаяся в повышении содержания Ti на 2,5 ат. %, снижении содержания Zr на 1 ат. % и Nb на 1,5 ат. %, для формирования химического состава сплава после СЛП, требуемого для максимальной реализации сверхупругого поведения при температуре эксплуатации. Экспериментально подтверждена эффективность такой корректировки, обеспечившей высокий комплекс функциональных свойств, персонализируемых ортопедических имплантатов из сплава Ti-Zr-Nb.

В девятой главе представлены результаты исследования биосовместимости сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb после разработанных в данной диссертации методов их обработки в сравнении со сплавом Ti-Al-Nb медицинского назначения. Полученные результаты подтверждают, что все образцы сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb после ТМО и после СЛП являются биосовместимыми, а именно поддерживают адгезию, пролиферацию и жизнеспособность остеобластоподобных клеток MG-63 и обеспечивают возможность миграции клеток на поверхности.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы по проведенному анализу.

Высокая степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием современных средств и методов исследований и испытаний, статистически обоснованным объемом экспериментальных исследований.

Полученные результаты положены в основу статей в рецензируемых журналах, а также включены в отчеты по проектам, представлены и обсуждены на российских и международных конференциях.

Научная новизна работы:

1. Впервые изучено термомеханическое поведение сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb нового поколения в условиях деформации сжатием в широком интервале температур (от 20 до 1000 °С) и скоростей деформации (от 0,1 до 10 с⁻¹) и установлены закономерности изменения параметров диаграмм деформации, твердости, формирования структуры и фазового состояния. Получены реологические модели, являющиеся основой для проведения математического моделирования процессов ОМД

2. С применением моделирования методом конечных элементов выявлены особенности изменения напряженно-деформированного состояния при варьировании угла подачи, коэффициента вытяжки и температуры деформации в ходе РСП заготовок из сплава Ti-Zr-Nb. Установлены закономерности развития пластической деформации в комбинированном процессе получения прутковых полуфабрикатов из сплава Ti-Zr-Nb,

сочетающем РСП и РК, и показана его эффективность для обеспечения равномерного распределения напряжений и деформаций по сечению.

3. Установлены закономерности структурообразования и связанного с ним изменения механических и функциональных свойств сплава Ti-Zr-Nb в результате НТМО, включающей холодную прокатку со степенями деформации от умеренной ($\epsilon=0,3$) до интенсивной ($\epsilon=3$) и ПДО при температурах 450–600 °С. Показано, что формирование в сплаве полигонизованной субмикросубзеренной структуры β -фазы в результате умеренной холодной прокатки и ПДО при 550 °С обеспечивает наилучший комплекс механических и функциональных свойств среди других вариантов ТМО по схеме НТМО.

4. Экспериментально показано, что сплавы Ti-Zr-Nb со смешанной динамически полигонизованной и динамически рекристаллизованной структурой β -фазы, сформированной в результате горячей деформации в цикле ВТМО, демонстрируют повышение функциональной усталостной долговечности в 1,5 и более раза по сравнению со структурой, сформированной в результате развития статических процессов при ПДО в цикле НТМО. При этом наибольшая усталостная долговечность достигается в случае образования преимущественно динамически полигонизованной субструктуры.

5. Впервые установлены закономерности формирования структуры, фазового состояния и кристаллографической текстуры в длинномерных прутковых полуфабрикатах из сплавов Ti-Zr-Nb в результате комбинированной низкотемпературной и высокотемпературной ТМО, сочетающей РСП, РК и ПДО; установлена взаимосвязь перечисленных характеристик с механическими и функциональными свойствами.

6. Экспериментально показана эффективность старения, направленного на контролируемое выделение частиц ω -фазы в сплаве Ti-Zr-Nb, для повышения прочности ($\sigma_{\text{в}} \geq 900$ МПа) и сохранения удовлетворительной пластичности ($\delta \geq 10$ %). Установлено, что эффект дисперсионного упрочнения гораздо больше эффекта деформационного упрочнения. При этом старение приводит к значительному ухудшению функциональных свойств, включающему деградацию сверхупругого поведения и увеличение модуля Юнга.

7. Установлены закономерности формирования структуры, фазового состояния и кристаллографической текстуры длинномерных прутковых полуфабрикатов из сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb в результате комбинированной высокотемпературной ТМО, сочетающей РСП, РК и ПП в трехвалковом калибре; установлена их взаимосвязь с механическими и функциональными свойствами. Показано, что сплав с преимущественно динамически полигонизованной субструктурой внутри зерен β -фазы и преобладающей кристаллографической текстурой в направлении $[011]_{\beta}$ демонстрирует рекордный комплекс механических и функциональных свойств: низкий модуль Юнга ($E \leq 45$ ГПа), высокие обратимая сверхупругая деформация ($\epsilon_{r^{se}}^{\text{max}} = 3,6$ %), предел прочности ($\sigma_{\text{в}} \geq 725$ МПа) и относительное удлинение до разрушения ($\delta \geq 15$ %).

8. Впервые выявлены закономерности формирования структуры, фазового состояния и кристаллографической текстуры сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb в результате комбинированной низкотемпературной и высокотемпературной РКУП и ПДО и установлена их взаимосвязь с механическими и функциональными свойствами. Показано, что РКУП при 500 °С, обеспечивающее технологичность при получении качественных заготовок, способствует формированию в сплаве динамически полигонизованной субструктуры β -фазы и реализации наилучшего сочетания механических и функциональных свойств с высокой функциональной долговечностью.

9. Впервые установлены закономерности формирования структуры, фазового состава и кристаллографической текстуры сплавов Ti-Zr-Nb, полученных сочетанием СЛП, термической и термоциклической обработки; выявлена их взаимосвязь с полученным комплексом механических и функциональных свойств.

Практическая значимость результатов:

1. Разработанная технология комбинированной термомеханической обработки сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb использована при производстве опытных партий длинномерных прутковых полуфабрикатов на производственных площадках НПЦ «ОМД» с применением РСП, ООО «МАТЭК-СПФ» с применением РК и ООО «Мегаметалл» с применением ПП в трехвалковом калибре. Разработаны и утверждены Технические условия (ТУ 24.45.30-001-02066500-2023) на прутки из сплава Ti-Zr-Nb с памятью формы, которые будут использованы при подготовке регистрационных удостоверений на готовые изделия из указанного материала.

2. Из прутковых заготовок сплава Ti-18Zr-15Nb (в ат.%) в ООО «КОНМЕТ» изготовлены балки для систем транспедикулярной фиксации позвоночника, которые успешно прошли стандартизированные испытания. Результаты сравнительных стандартизированных испытаний балок для систем транспедикулярной фиксации позвоночника из сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb, продемонстрировавшие их преимущества в низкой жесткости по сравнению с балками из сплавов Ti-Ni и Ti-Al-Nb, подтвердили перспективность данных сплавов в качестве материалов для спинальных имплантатов.

3. Обоснована корректировка состава исходного слитка, заключающаяся в повышении содержания Ti на 2,5 ат. %, снижении содержания Zr на 1 ат.% и Nb на 1,5 ат.%, для формирования химического состава сплава после СЛП, требуемого для максимальной реализации сверхупругого поведения при температуре эксплуатации. Соответствующая корректировка была успешно осуществлена на практике, она позволила реализовать сверхупругое поведения сплава Ti-Zr-Nb при температуре эксплуатации и обеспечить высокий комплекс функциональных свойств персонализируемых ортопедических имплантатов.

4. Разработаны рекомендации по выбору режимов СЛП и ТО для получения персонализируемых имплантатов из сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb с высоким уровнем функциональных свойств. Разработанные режимы СЛП и ТО использованы в ООО «КОНМЕТ» при изготовлении экспериментальных образцов и прототипа кейджа на основе пористых сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb для замены межпозвоночных дисков. Разработаны и утверждены Технические условия (ТУ 24.45.30-001-02066500-2023) на порошок из сплава Ti-Zr-Nb с памятью формы, которые будут использованы при подготовке регистрационных удостоверений на готовые изделия из указанного материала.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы В. А. Шереметьева могут быть использованы на промышленных предприятиях, занимающихся изготовлением полуфабрикатов из титановых сплавов, таких как: АО «ЧМЗ», ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», ООО «Мегаметалл», ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ». Основными потребителями полуфабрикатов из сплавов Ti-Zr-Nb и технологиями их обработки могут быть компании-изготовители имплантатов, такие как: ООО «КОНМЕТ» (г. Москва), ООО «Остеомед» (г. Москва), а также травматологические исследовательские институты, государственные медицинские учреждения, такие как: Национальный медицинский исследовательский

центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова Минздрава России (г. Москва), Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена (г. Санкт-Петербург). Кроме того, результаты работы могут быть востребованы в научно-исследовательских институтах и центрах, занимающихся исследованиями и разработками сплавов с памятью формы медицинского назначения.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. Основное содержание диссертации с достаточной полнотой изложено в 26 печатных работах, из них 26 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (в том числе статьи, входящие в Scopus), получено 4 патента Российской Федерации.

Замечания к диссертационной работе:

1. При исследовании влияния режимов низкотемпературной термомеханической обработки, включающей холодную прокатку с умеренной и интенсивной степенью деформации, на структурообразование сплава Ti-Zr-Nb, изложенном в Главе 5, не рассматривается изменение кристаллографической текстуры.

2. В работе отсутствует объяснение взаимосвязи результатов конечно-элементного моделирования процессов РСП и РК в части напряженно-деформированного состояния с результатами реализации соответствующей технологии в промышленных условиях получения длинномерных прутковых полуфабрикатов.

3. Механические и функциональные испытания образцов и изделий из сплава Ti-Zr-Nb проведены преимущественно при комнатной температуре. Однако, известно, что имплантаты функционируют в организме человека при температуре 37°C. Различие функционального поведения разрабатываемых материалов при реальной температуре эксплуатации в работе не обсуждается.

4. При исследовании термомеханического поведения сплавов Ti-Zr-Nb в условиях деформации сжатием применяется широкий интервал скоростей (от 0,1 до 10 с⁻¹) деформации. Однако, при использовании того или иного метода обработки металлов давлением, которые применяются для проведения ТМО, не всегда уточняется скорость деформации и, соответственно, не обсуждается взаимосвязь результатов исследования реологического поведения с применением промышленных методов деформирования сплава.

Указанные замечания не снижают научного и практического значения выполненной работы и не влияют на новизну и достоверность положений, выносимых на защиту.

Заключение

Диссертационная работа В. А. Шереметьева «Научно-технологические основы получения и обработки сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb методами комбинированной термомеханической обработки и селективного лазерного плавления для изготовления ортопедических имплантатов» является самостоятельным, логически завершенным исследованием. Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о порядке присуждения ученых степеней в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», а ее автор, Вадим Алексеевич Шереметьев, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв составлен заведующим лабораторией физики высокопрочных кристаллов Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета, доктором физико-математических наук, профессором Чумляковым Юрием Ивановичем на основании положительного заключения объединенного семинара кафедры физики металлов физического факультета и лабораторий Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета (протокол № 42 от 28.08.2024).

Заведующий лабораторией физики
высокопрочных кристаллов
Сибирского физико-технического института
имени академика В.Д. Кузнецова
Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук
(01.04.07 – Физика твердого тела),
профессор



Чумляков Юрий Иванович

12 сентября 2024 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»; 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; тел. (3822) 52-98-52, rector@tsu.ru, <http://www.tsu.ru>